

# The AX-PET demonstrator – Design, construction and characterization

P. Beltrame<sup>a</sup>, E. Bolle<sup>a</sup>, A. Braem<sup>a</sup>, C. Casella<sup>b</sup>, E. Chesi<sup>a</sup>, N. Clinthorne<sup>f</sup>, R. De Leo<sup>d</sup>, G. Dissertori<sup>b</sup>, L. Djambazov<sup>b</sup>, V. Fantì<sup>a,1</sup>, M. Heller<sup>a</sup>, C. Joram<sup>a</sup>, H. Kagan<sup>e</sup>, W. Lustermann<sup>b</sup>, F. Meddi<sup>b</sup>, E. Nappi<sup>d</sup>, F. Nessi-Tedaldi<sup>b</sup>, J.F. Oliver<sup>c</sup>, F. Pauss<sup>b</sup>, M. Rafecas<sup>c</sup>, D. Renker<sup>b,2</sup>, A. Rudge<sup>e</sup>, D. Schinzel<sup>b,3</sup>, T. Schneider<sup>a</sup>, J. Seguinot<sup>e</sup>, P. Solevi<sup>c</sup>, S. Stappes<sup>g</sup>, P. Weilhammer<sup>e</sup>

<sup>a)</sup> CERN, PH Department, CH-1211 Geneva, Switzerland

<sup>b)</sup> Institute for Particle Physics, ETH Zurich, CH-8093 Zurich, Switzerland

<sup>c)</sup> IFIC (Universidad de Valencia/CSIC), E-46071 Valencia, Spain

<sup>d)</sup> INFN, Sezione di Bari, I-70122 Bari, Italy

<sup>e)</sup> Ohio State University, Columbus, Ohio 43210, USA

<sup>f)</sup> University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, USA

<sup>g)</sup> University of Oslo, NO-0317 Oslo, Norway

<sup>h)</sup> University of Rome “La Sapienza”, I-00185 Rome, Italy

**概要:** Axial-PET は陽電子放射核断層法 (PET: Positron Emission Tomography) の新しいコンセプトである。これは、軸方向のボア軸と整列された長いシンチレータ結晶棒の層に基づいている。軸座標は波長変換 (WLS) プレートが結晶と直角に交わっていることから得られる。この記事ではデモンストラータ・セットアップの設計、構造、性能評価を説明する。このセットアップは2つの同じ検出モジュールの構成で、同時に使用される (**つまり、2 ガンマのイベントを撮りたいんだ。**)。それぞれのモジュールは48個の LYSO 結晶 (長さ 100 mm) と 156 個の WLS ストリップで成る。結晶とストリップはガイガーモード APD (G-APD) で読み出される。2つのモジュールからの信号は全アナログ・フロントエンド・エレクトロニクスによって記録媒体へ貯蔵される、VME ベースのデータ収集システムによって同時のとき、<sup>22</sup>Na の点線源による測定 (使用するモジュールの両方それぞれと同時モード) は点線源の焦点平面の再構成において完全性能評価を許す (**?、いみわからん。22 Na を使って、性能評価をしたのだろう。線源を使って、焦点の平面の再構成まで完全に性能評価した。**)。期待通りの良い結果が得られた。そして、放射性トレーサで満ちた PET ファイントムでの次回の評価段階への準備のためのセットアップを証明した。

© 2011 Elsevier B.V. All rights reserved.

**目次:** 1. 導入、1. 1. AX-PET コンセプト、1. 2. 背景、1. 3. 記事の概要、2. AX-PET モジュール、2. 1. シンチレータ結晶板、2. 2. 波長変換ストリップ、2. 3. 光検出器、2. 4. 原理設計、2. 5. フロントエンド・エレクトロニクス、2. 6. データ収集、2. 7. トリガー、2. 8. 温度モニタリング、3. 実験セットアップと解析、3. 1. スキャンニング・セットアップ、3. 2. コインシデンス・セットアップ、3. 3. ソフトウェア解析、4. 単モジュールの特徴、4. 1. 結晶と波長変換、4. 2. 検出効率と一様性、4. 3. 軸の分解能、4. 4. 結晶の本質的な放射能、4. 5. 結晶のエネルギー構成、4. 6. エネルギー分解能、4. 7. 発光光子の透過長、4. 8. 温度補正係数、5. コインシデンス測定、5. 1. 時間分解能、5. 2. 焦点平面の分解能、5. 3. 軸の分解能、6. まとめと展望

**1. 導入：** 陽電子放出核断層法は複雑な機能をもつ医療画像法だけでなく強力である。それは、陽電子が対消滅してできた 511 keV ガンマ線の2本同時に記録することを基本にしている。この同時のデータの断層再構成は3次元の線源分布を再構成することができる。

50年よりもっと研究と開発され、PET スキャナーの感度と空間分解能の改善された。はじめ、高いZ(原子番号)と高い密度のシンチレータ(感度向上と新しい光検出器の速さ、そして読出し回路の改善)は身のある進捗を可能にした、バックグラウンドの抑制(ランダムコインシデンス)とデータ収集容量(カウントレート飽和)。同様に重要なものがデータ収集の取り扱い、優位な統計性の再構成法、不均一質性なサンプル評価、減衰や散乱のオブジェクトなどの画像劣化減少の補正で獲得した発展である。

PETの物理(特に、組織(原子とか)の中で優先度の高い対消滅と2つの対消滅光子の小さい非共線性陽における電子の拡散)は高い分解能を獲得する上でいくつかの制約を課す。これらの現象は部分的に補うことができる。陽電子の広がりと再構成アルゴリズムの統計的反復への共線性の両方の適切なモデルを含むことによって(陽電子の広がりと再構成アルゴリズムの統計的反復への共線性の両方の適切なモデルを含むことによって、これらの現象を部分的に補うことができる。)。この方法では、ミリメートル・レベルの空間分解能が得られる。全身用システムとそのような最終的な性能の臨床的実現は、患者が動くときの補正も必要とする<sup>[1]</sup>。

標準のPETのジオメトリは放射状に配置したシンチレータ結晶を基本として、光検出器によって一端で読み出す。扱いやすいチャンネルの読出しの数を維持するために、結晶のブロックはアンガー・ロジックの平均によってしばしば一緒に読み出す。ここで、アンガー・ロジックとは、放射線の入射によって生じたシンチレーション光が、空間的な広がりを以て検出された場合、当該シンチレーション光の重心位置を求めることに依って、放射線の入射位置を特定する手法である。不在もしくは限定されたDOI情報は視差エラー(空間分解能の劣化を結果として生じる)を読む、これは視野の周辺領域に向かって悪化する。結晶の長さを減らすことはそれらの問題だけでなくシステムの感度の妥協も軽減できる。

Axial コンセプト(我々が全制御のセットアップの一致、と2つのモジュールにおいて証明する)は分解能と感度間の妥協を避け、そしてそれぞれ他から独立に両方を設定することができる。物理的な空間分解能の限界は高い感度を維持出来るまでに到達した。しかし、報告書の一部ではないものの、それはまだ述べることに価値がある。というのは、axial コンセプトは任意の方法で磁気共鳴装置(MRI)とPETのTOF情報の同時登録使用を排除するものではない。

[1] M. Blume, et al., IEEE Trans. Med. Imaging 29 (11) (2010) 1892.

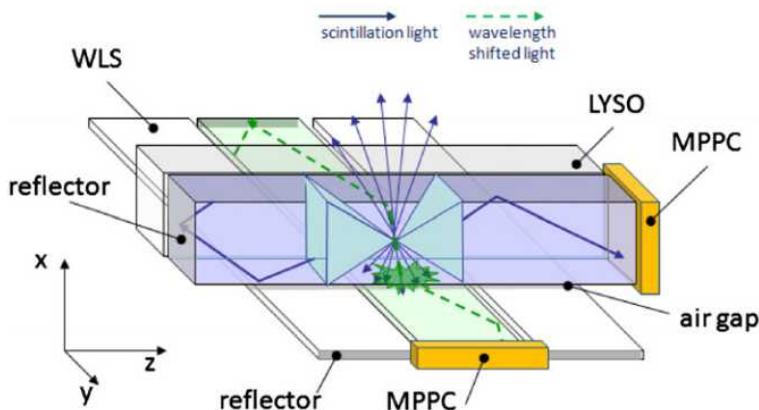
**1.1. Axial PETのコンセプト：** Axial PETの主な特徴は長くそして個々に読みだすシンチレータ結晶を軸状に設置していることである。この結晶(いくつかの層に重ねられている)は、スキャン軸方向(z軸)に平行に整列されている。ヒット結晶のアドレスが生んだ光子の相互作用した位置の2次元情報(X,Y)の分解能は結晶の断面積によって決定される( $\sigma_{x,y} = d/\sqrt{12}$ ) ここで、dは結晶の横次元である)。3つ目の座標(z)はWLSプラスチック棒から得る。これは、少しの空気ギャップがあり、結晶の下層にそれぞれ垂直方向に設置される(図1)。ストリップと結晶の両方を個別に読出す、片側のガイガーモード・アバランシェ・フォトダイオード(G-APD)で。それらの他端は薄いアルミ反射コーティングで覆われている。G-APD(これはシリコンフォトマルチプライ; SiPMとして知られている)はMPPC(Multi Pixel

Photon Counters)としてこのテキストでは呼ぶことにします。

エネルギーを落とした後、シンチレーション光の相互関係のある量は結晶で等方的に放射する。全反射のコーン内を放射する光は結晶内を進み、MPPCによって収集され、エネルギー測定提供される。コーンの外へ広がっている光の一部は結晶から逃げて、WLSストリップによって吸収される。波長が転換された後(青から緑へ)、その一部は光検出器に向かって内部を進む。WLSストリップのアドレスはZ座標を与える。普通、光は一つのストリップ以上によって検出される、そして偏った平均は軸上の正確な座標を得ることに使うことができる、これはストリップの幅で決定されるデジタルな分解能を超える。

axial コンセプトは視差の誤差を除く対消滅光子の3次元位置再構成を十分明確に読みだす。空間分解能とPETカメラモジュールの感度は結晶/ストリップの次元と結晶層の数で多様にそれぞれが調整することが出来る。我々のコンセプトの3次元光子の弁別能力はコンプトン相互作用の識別を可能にする、結晶のマトリックスで(内部結晶散乱)。それらの散乱事象を十分回復できることをシミュレーションで暗示する<sup>[3]</sup>。

[3] M. Rafecas, et al., Phys. Med. Biol. 48 (7) (2003) 821.



**1. 2. 背景:** シンチレータ結晶の軸上配置は自然で、すべての放射線幾何学固有の視差による誤差を抑制するための素直なアイデアである。1988年、清水らはPETカメラの軸状幾何学を記述した<sup>[4]</sup>。これは結晶配列を両側から分割して光検出器によって読みだす。軸座標は2つの結晶の端で検出された光量のレベルの比から得られる。このコンセプトは特許を取ったが、我々の知識は実験的な証明は決していない。この論文の教書社のサブグループは数年間、この目的のために開発した特にハイブリッド・フォトディテクター (HPD)を用いた両側読出しによる同様の軸上コンセプトの実行をした<sup>[5, 6]</sup>。しかし、ミリメータ領域の軸上分解能はゴールに達成できないままであった。最先端のシンチレータの素晴らしい光学の透明性(これはエネルギーと時間分解能の最適化)は明らかに光共有のためには逆効果である。最近の光検出器(MPPC)の出現でこれと波長変換を経由して一緒にシンチレータの読出しをするコンセプトの良い証明はこれらの限界を克服できる軸上のコンセプトの新しい実行を考える

ことができる<sup>[7]</sup>。HPDを基にした真空の個体状態のMPPCデバイスの交換は磁場への追加特権(イマニティ:免除される)を持ってきてくれる。これはPETとMRIの組み合わせには必要条件である。

[4] K. Shimizu, et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-34 (1) (1988) 717.

[5] J. S&eacute;guinot, et al., Il Nuovo Cimento C 29 (2005) 429.

[6] F. Ciocia, et al., Nucl. Instr. And Meth. A 600 (2009) 506.

[7] A. Braem, et al., Nucl. Instr. And Meth. A 586 (2008) 300.

**1. 3. この論文の概要:** この論文では、設計、構造そして細部特徴における2つのモジュールでの測定結果を記述する。我々はこれをこのコンセプトのセットアップの証明として考えている。この論文は次で組織化されている。セクション2はモジュールの幾何学と、これらすべてのエッセンシャル(欠かすことのできない重要な)構造と読み出しの主な性質を説明する。これはセクション3で説明する実験的なセットアップとその測定のための解析戦略の採用に続く。その特徴測定の結果セクション4と5でモジュール性能と同時計測についてがそれぞれ与えられる。最後にセクション6ではまとめと、見かけ状のPETの測定での展望を与える。

**2. AX-PET モジュール:** それぞれのAX-PETモジュールは8個の結晶と26個のWLSストリップからそれぞれ6個の層を成し、故に合計48個のシンチレータ結晶と156個のWLSストリップである(図2.を見よ)。結晶とストリップは2つ異なったMPPCで読み出される。それぞれのMPPCにはそれぞれ(電圧が)供給され、温度変化に従う一定の増幅率が調節される。その信号は増倍され収められたVLSI-ASICによって整形される。これは正確な電荷と結晶内で落としたエネルギーに比例して、そしてWLSストリップ内での光量を測定を含んでいる。トリガー論理は低く設定できる、そして全モジュールでおとしたエネルギーの合計がしきい値以上(400 – 600 keV)。そのデータは標準的なデスクトップパソコンのインターフェイスであるVME-PCを経由して読み出される。

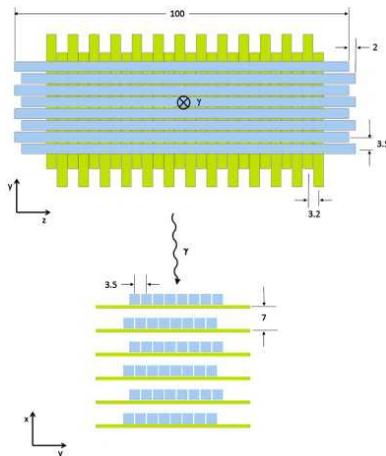


図2. それぞれのおACX-PETの幾何学の2側面表示。距離はmmで表示している。

**2.1. シンチレータ板:** シンチレータ板はLYSO結晶(Lu<sub>1.8</sub>Y<sub>0.2</sub>-SiO<sub>5</sub>:Ce)から作られていて、サンゴバン社が製作した(型番: PreLudeTM420)。LYSOは潮解性がないシンチレータ物質で以下の性質を持っている:密度  $\rho = 7.1 \text{ g/cm}^3$ ; 光量は  $LY = 32 \text{ ph/keV}$ ; 光量の温度依存性  $d(LY)/dT = -0.2 \text{ \% /K}$ ; 減衰長(511 keV)  $\lambda_{511} = 12 \text{ mm}$ ; シンチレーション光の減衰時間は1次の指数関数で  $\tau = 42 \text{ ns}$ 。LYSOの発光スペクトラムはピーク420 nmのピーク発光で360 – 600 nmにわたる。LYSOは自然放射性  $\beta$  線同位体 176Lu からなっている。これは優位に 176Hf(597keV)に崩壊し、安定状態後に崩壊するのに 307, 202, 88 keVのガンマ線を3本出す。3本のガンマ線の放射は  $\beta$  線と同時である。これは 39 cps/g で本来備わっている。

AX-PET デモンストラータのために使用された LYSO 結晶は  $3 \times 3 \times 100 \text{ mm}^3$  の次元を持つ。すべての表面は光学的に研磨されて端は尖っていて、クラックはない。その結晶はMPPCで読み出す表面を除いてコーティングもしくは膜は使用せず、その面には厚さが普通100 nmのアルミニウム・フィルム反射材(80 – 85%)を貼りつけている。先のコーティングは、すべての結晶はエネルギー分解能の個体差を持ち、収めたセットアップで吸収長( $\lambda_{opt}^*$ )が有効であった。この結果は 511keV で、 $\lambda_{opt}^* = (412 \pm 31) \text{ mm}$  と  $(\Delta E/E)_{intr} = (8.3 \pm 0.5)$  (FWHM)が得られた<sup>[8]</sup>。

[8] E. Bolle, et al., Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 197 (2009) 19.

**2.2. 波長変換ストリップ** :波長変換(WLS)プラスチックストリップは Eljen Technology から 型番 EJ-280-10x である。これらは  $3 \times 0.9 \times 40 \text{ mm}^3$  の次元を持つ。これはポリビニルトルエンを基にして通常製作の EJ-280 よりも10倍染料の濃度を要している。高い染料濃度は約 0.4 mm の吸収長で読み出される(青い光は)(図3をみよ)。ゆえに、ストリップの厚さ 0.9mm は吸収長の2倍以上に一致させている。吸収の最大は LYSO の発光スペクトラムに一致させている。WLS ストリップの読み出さない端には反射率 70 – 80%の厚さ 100nmのアルミニウム・フィルムを貼っている。WLS ストリップのサブセットはセットアップに収められ、特徴付けられる。光学的に波長変換の有効な吸収長は( $\lambda_{opt}^*$ )<sub>WLS</sub> = (188 ± 36) mm で、アルミフィルムを貼るために重要である<sup>[9]</sup>。

[9] A. Bream, et al., Nucl. Instr. And Meth. A 610 (2009) 192.

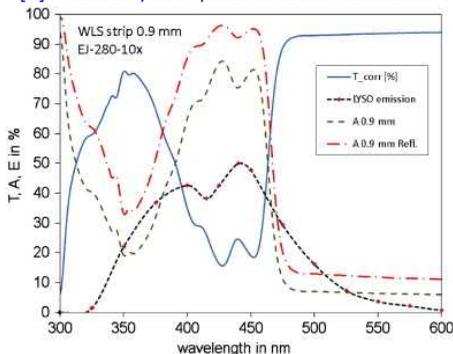


図3. WLS ストリップの通過した透過長の測定値(実線)。この工業用スペクトロメータで取得したデータはストリップ入り口でのフレネル反射の補正をしている。他の曲線は LYSO の発光スペクトラム(赤点と黒線)、厚さ 0.9mm のストリップの吸収を反射がある場合とない場合で

の光量の測定値を示す。

**2.3. 光検出器:** LYSO 結晶と WLS ストリップは個々にガイガーモード・アバランシェ・フォト・デテクター(G-APD)によって読み出される。これは浜松ホトニクスが製作した MPPC: Multi pixel Photon Counters である。結晶のために使用した MPPC は型番: S10362-33-050C で有効面積  $3 \times 3 \text{ mm}^2$  で  $50 \times 50 \text{ }\mu\text{m}^2$  のサイズが 3600 に分割されている。MPPC はセラミックの希釈剤に据え付けられ、受光面はエポキシ合成樹脂で保護されている。WLS ストリップのためには有効面積を  $3.22 \times 1.19 \text{ mm}^2$  に適合させ、 $70 \times 70 \text{ }\mu\text{m}^2$  サイズが 780 セルへ分割されて、使用されている。これらの MPPC は八角形の基板に据え付けられ、表面は同様にエポキシ合成樹脂で保護されている。MPPC は LYSO 結晶板もしくは WLS ストリップに光学的に透明な Silicon Dow Coining<sup>®</sup> 3145RTV で接着される。MPPC の有感領域とそれた接着剤での配置は納めた道具で保障されている。

結晶のために使用されている MPPC とサブサンプリングの WLS ストリップのために使用されている MPPC の全体セットは電荷増幅率の決定のためのバイアス電圧の決定の特徴を明らかにした。増幅値は受け入れレベルでの光子検出効率 (PDE $\sim$ 40%)、ダークノイズの保持、光学的クロストークの最適化のために選択される。そのパラメータは表 1 にまとめている。

それぞれの 408 個の MPPC は独立のバイアスがある。このバイアスは商業用 AD5535 32-channel 14bit DAC 電圧をベースにしたカスタム・ビルト・コントロール・ユニット<sup>[10]</sup>によって提供される。このユニットは LabVIEW プログラムで動かされる。これはマスターテーブルから電圧セッティングの要請を読み出す。安定な MPPC の増幅率を維持するために、マスターテーブルは温度変化に従って補正される(dG/dT $\sim$ 4.8 %/K, セクション 4.8 を見よ)。

	Crystal MPPC	WLS MPPC
Type	S10362-33-050C	Custom tailored
Character Gain	$6 \times 10^5$	$1 \times 10^6$
$V_{\text{bias}}$	$(70.95 \pm 0.22) \text{ V}$	$(70.38 \pm 0.59) \text{ V}$
dG/dV	$55 \times 10^4 \text{ V}^{-1}$	$110 \times 10^4 \text{ V}^{-1}$
Noise Rate at 0.5 p.e.	4.7 MHz	3.2 MHz
Noise Rate at 1.5 p.e.	0.9 MHz	0.5 MHz

表1. MPPC の主な特徴とパラメータ。増幅率、バイアスそしてノイズ頻度、温度は25度で。V<sub>bias</sub> は平均バイアスとその RMS、96 個を超えるの結晶の MOOC と 312 個の WLSF の MPPC の平均で報告している。

[10] V. Commichau, et al., A multi-channel G-APD bias voltage supply based on the AD5535 32 channel DAC circuit ETH Zurich, Institute for Particle Physics Technical Note, 2010, ETHZ-IPP-2010-06.

**2.4. メカニカルな設計:** カメラモジュールのメカニカルな設計はいくつかの部分的に矛盾する要請によって決められている: 高いパッキング密度 (商業的な互換性は MPPC パッケージで得られる); 0.1 mm のレベルですべてのアクティブ要素の精密な位置; 集光効率を保持するために構造とアクティブ要素の間は最小の光学的な接触; コンプトン散乱を最小にする合理的な低密度の予算; 他にもたくさん例はあるだろうが、分解しやすいように、取り替え修理可能の考え。

図 2. と 4. は AX-PET モジュールの LYSO 結晶がそれぞれ 8 個 6 層のメカニカルな配置を示す。パッキング密度が最大のために、結晶と WLS ストリップは側面を交互に読み出される。

層の結晶ピッチは 3.5mm で、層と層のピッチは X 方向に 7mm。ある層の 8 個の結晶は z 座標の 2mm ずらす。結晶の層は Y 座標に結晶のピッチの半分 (1.75 mm) ずらす。これらの層の中の互い違いは光子相互作用可能性の最適のために役立つ。26 個の WLSF ストリップの設置はそれぞれの結晶の層の下に据え付けられる。これは x 座標で 0.2mm の空気ギャップがある。WLS ストリップのピッチは 3.2mm である。WLS ストリップは Y に 5.4mm ずらされている。しかし、別の層の WLS ストリップとの水平のずれはない。結晶と波長変換の 6 個の層は薄い炭素繊維シートによって光学的に離れている (図には示されていない)。これは WLS に面する側に白色核酸反射塗料で塗装されている。これらはある層からのシンチレーション光が伝搬してくるのを避け、そして WLS ストリップの有効な光吸収を増やす。

この結晶は 2 つの薄い穴の開いたマスクで位置を保持される。そして、CuB シートで生産されたフォトリソグラフィティで成している。これはいくつかのポイントで最小にメカニカルな接触をする。この配置はアルミニウムの箱構造の中に固定される。そして、前面と側面パネルの MPPC の支えも。軸方向において、MPPC はフォームストッパーに対して若干結晶を押し込む。WLS ストリップは MPPC と接着されて位置を保持される。補助フレーム構造 (図4の底部で部分的に見える) パッチパネルを据え付けるためにモジュールに接続される。パッチパネルはバイアス電圧と信号パルスを送信する。全体のモジュール構造は軽くて頑丈なアルミ箱の中で成している; 光子の入射窓は  $50\ \mu\text{m}$  と薄いアルミホイルである。

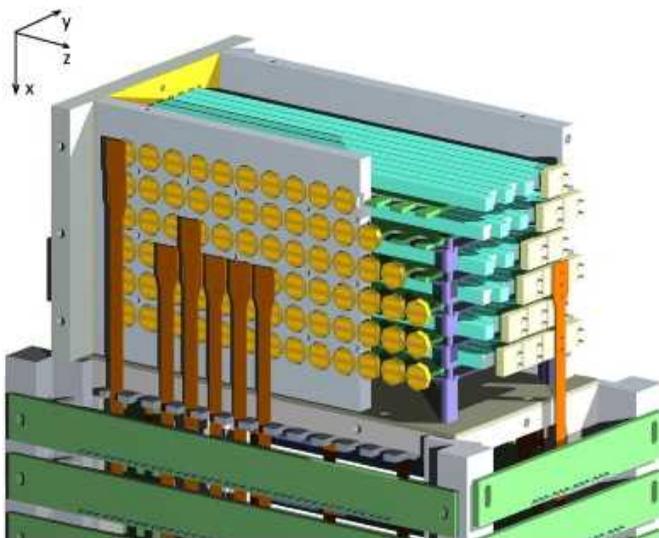


図 4. AX-PET カメラモジュールのメカニズム。いくつかの成分 (軽くて丈夫なカバー、いくつかの構造成分のような) は良くみえるために削除した。

**2.5. フロントエンド・エレクトロニクス:** AX-PET デモンストレータは 96 個の結晶と 312 個の WLS ストリップのすべてのアナログ読出し回路を特徴とする。フロントエンド回路は光検出器からの信号の増幅とそれらを VATAGP5 ASIC チップへ転送する<sup>[11]</sup>。その信号は ASIC の整形時間 300ns の間に積分されて (トリガーが陽性になった場合)、10-bit ADC でデジタルライズされる。検出器上の回路の小型化のため、消費熱と空間不足の理由のため、MPPC

の信号はカプトン・ストリップケーブルを経由してパッチパネルへ分配される。そして、それらは同軸ケーブルを経由してカスタムメイドされた PCB ボードへ送られ、各個体間の飛行時間差を最小にために注意した。

1チャンネルの機能性は図5に模式的に示す。一般的なフロントエンドの構造と DAQ システムは図6に略図をかく。MPPC の出力信号は 50Ω 入力インピーダンス電圧増幅へ送られる。ここで、増幅率は LYSO のほうは 7.5 で WLSF のほうは 50 である。テキサス・インスツルメンツは OPA843 と OPA847 をそれぞれ増幅し(バンド領域 3.9GHz のゲイン)、使用される。それぞれのモジュールで落とした合計エネルギーの和は LYSO の増幅器から生じ、そして外部トリガーで 511 keV の事象を選択して使用する(セクション 2.7 を見よ)。LYSO の信号の和は MPPC の DC 結合で、ベースラインシフトを気にする頻度を回避するために。

増幅した出力は 4 つの VATAGP5 チップを経由したカレント入力を与え、PCB 分割で据え付けられている。VATAGP5 チップはシリアル読出しモードも使用することができ、これは全チャンネルの多量化による、また、まばらな読出しモードもできる、これはしきい値を超えたヒットチャンネルのみのアドレスによる。入力では、信号は2つの枝に分配する、早いのと遅いのを早い枝はディスクリミネータのあとに 50ns の整形からなる。選択されたしきい値を超えた信号はヒット・レジスター(記録媒体)に蓄えられる。トリガーの後、データロック信号は 60ns の持続時間の記録可能で、そして選ばれたチャンネルは 300ns の遅いシェイパーを経由して読み出される。これらのアナログ信号はデータ収集システムにおいて、10-bit ADC を経由して読み出される。

トリガー信号は外部もしくは内部からどちらでも与えることができる(セルフトリガーモード)。内部トリガーモードを使用した時、任意のしきい値を超えたチャンネルは収集し始める。普通のデータ取得は外部トリガーで実施される。内部トリガーは LYSO 結晶の持つ固有の放射能を検出するために使用される。エネルギーキャリブレーション役立つ。どちらのトリガーモードオプションでも、あばらな読出しモードは使用される。そのシリアルチャンネルはペDESTAL取得のために採用されている。

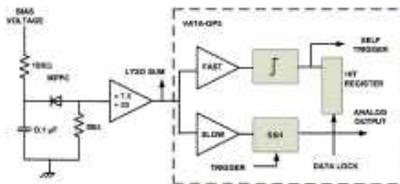


図5.

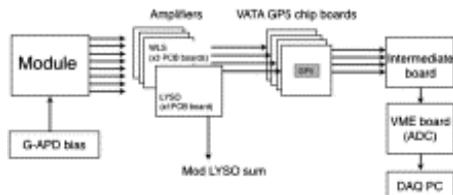


図6.

[11] E. Chesi, et al. Nucl. Instr. and Meth. A, 564 (2006), p. 352.

**2.6. データ収集:** データ収集システムは XILINX FPGA を基にした VMEbus ボードのカスタムメイドが使われる。ある VME ボードはそのモジュールを制御し、そして中間のボードから信号を受け取る。ここでモジュールに使用されている4つの VADAGP5 チップが同時信号のとき(図6)。

DAQ ソフトウェアは VME create にインストールされてた MEN A20 シングルボードプロセッサ上で起動する。DIM プロトコルを通過したデータ収集のそれぞれの Run の開始において遅い PC 制御でも通信する。この通信はモジュールの温度を读出したり、データファイルの蓄積のために使用される。そして以下で説明するデータファイルの座標の蓄積とモーションシステムの制御のために使用する。このシステムは 10kHz の過剰な頻度でのデータ取得を達成した。

**2.7. トリガー:** トリガー回路は $^{22}\text{Na}$  線源でのテストを考える。これは $^{22}\text{Na}$ の同位体崩壊を実際に使用する - 陽電子を放出する - Ne の励起状態になる。そして、その陽電子(平均 0.21 MeV の運動エネルギーをもつ)は近くの電子と静止状態で消滅し、2つの準逆並行の光子(それぞれエネルギー 511 keV)を放出する。その娘核の $^{22}\text{Ne}^*$ は崩壊して(陽電子を放出してから数 psec 以内に)、エネルギー 1.27 MeV の光子を放出して基底状態になる。

トリガー回路は2つの AX-PET モジュールが同時もしくはひとつのモジュールと小さなタグしているシンチレータが同時のどちらかのコインシデンスを形成する。これはテスト目的に使用される。この回路 - 通常 NIM モジュールで実行する - は図 7 に示す。それぞれのモジュールのパルスハイト LYSO の和は約 50 keV(LL), 400 keV (HL)そして、600 keV (HHL)にしきい値で区別(ディスクリミネート)している。タイプ LL x HL x HHL のコインシデンスはこの事象が 400 – 600 keV のエネルギー領域の検出のみを保証し、線源からの 1.27 MeV の  $\gamma$  光子放射を抑制する。このコインシデンスは同様に、50keV の区別が LL x HL x HHL 信号のタイミングを定義している。したがって、その時間のふらつきが最小になる。足した信号の使用は早く示し、そしてどのモジュールで 511 keV の光子が相互作用したかを決定するためには素晴らしい方法だ。モジュール内の相互作用した詳細は独立している(光電効果、コンプトン+光電効果、など)。セットアップの要請に依存して、2つのモジュールに同時計測(LL x HL x HHL)<sub>1</sub> x (LL x HL x HHL)<sub>2</sub>またはあるモジュールとタグの同時計測(LL x HL x HHL)<sub>1</sub> x (LL x HHL)<sub>tagger</sub> は DAQ のトリガーに使用される。タグの結晶は 50 – 400 keV のしきい値で2倍区別(ディスクリミネート)する。単純な不感時間論理は事象のパイルアップも回避する。

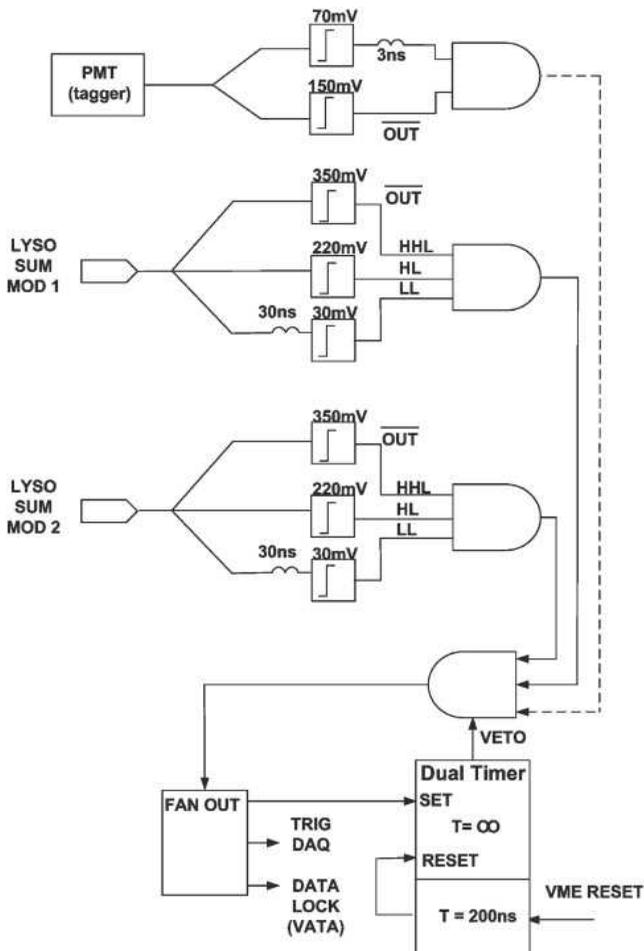


図7

**2.8. 温度監視:** このモジュールはエアコン室内で制御されている。しかし、冷却しているわけではない。セクション 4.8 で説明するが、MPPC の増幅率は温度に強く依存する。これは LYSO 結晶の発光光量の温度変化よりも一桁程大きい。増幅率一定を主張するために、MPPC のバイアス電圧は温度変化に従って変化しなくてはいけない。もし、データ収集の間に温度変化を記録していたらオフライン解析で増幅率の補正を行うことができる。温度は AD590 アナログデバイスのオンドセンサーを使用し、モジュールの 4 隅のフレームに取り付け、これらの平均値を LabVIEW プログラムでいつまでも監視される。セットアップ導入の前にこのセンサーは幅広い温度領域で小さい人工気象室ないで温度に従うプローブを直接比較してキャリブレーションされている。センサーの温度キャリブレーションは 0.1 K の精度を達成した。

**3. 実験的セットアップと解析:** 実験のセットアップは検出器モジュールの表面に制御された寸法の光子ビームでスキャンするように構築されている。この手続きはモジュールそれぞれの個々の特性のために使用される。セットアップの小さい修正は 2つのモジュールのコインシデンスのテストも可能した。

**3.1. スキャン・セットアップ:** 一つのモジュールの特徴のためのスキャン・セットアップは図8に示す。 $^{22}\text{Na}$  線源を使用した。この線源は 1MBq の放射能で、有効面積は直径 0.25 mm、直径 25.4 mm 厚さ 6.35 mm のプレキシガラスの中央に嵌めこまれていて、モジュールと小さいシンチレーション結晶の間に据え付けられている。線源からの 511 keV のガンマ線エネルギーのタグを使用して、モジュールとシンチレータのコインシデンス事象を選択している。タグしている結晶(LYSO)は速い PMT で有効面積直径 8mm (浜ホト) 型番 R7400U で読み出されている。2つの異なるタグしている結晶は  $2 \times 2 \times 12$  と  $2 \times 10 \times 12 \text{ mm}^3$  の次元を使用した。タガー(モジュールと線源)間の距離は有効で、モジュールでの異なる光子ビームの点のサイズを成し遂げた。典型的に、2つ異なる設定を加えた。一つ目 (small tagger setup) はタガーとして小さな結晶を使用し、そして線源はモジュールにくっつけるくらいにおいた;これは実験のほとんどの層で光子ビームを RMS で 0.4 mm 位のコレメートを提供している。2つ目の設置(big tagger setup)は大きい結晶と線源とモジュールの間の最大距離をしようし、目的は大きいスポットでモジュールの照度一様性をみる。典型的に 100 と 450 kHz の頻度で大と小のセットアップをそれぞれ記録した。これは立体角と検出確率の考慮から予期される値と良く一致する。

このセットアップで、モジュールは  $^{22}\text{Na}$  線源がタガーと一緒に 2 軸 (Y と Z) 線形に動けるシステムに据え付けられている間は固定され続けられる。線源とタガーをずらすシステムによって、全モジュール表面は約 0.1 mm の精密さでスキャンすることができる。2つの軸にはモーターが付けられ、LabVIEW インターフェイスを経由してコンピュータ制御される。

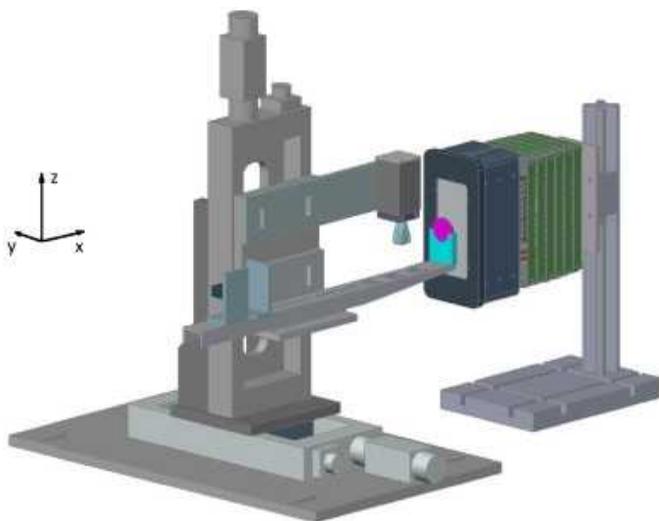


図8

**3.2. コインシデンス・セットアップ:** 単純なスキャン・セットアップの調節は2つのモジュールの Coincidence 測定のために許容されている。2つのモジュールは 15 cm の距離で互い固定されている。 $^{22}\text{Na}$  線源は2軸の間を動かせるシステムを備えている、軸変化と長軸断の位置の Coincidence 応答の研究のために。測定した典型的な Coincidence 頻度は約 3kHz である、ただし線源は中央に位置する。

**3.3. 解析ソフトウェア:** 解析コードを基にした ROOT は生データ・セットに適用し、DAQ システムによって収集される。まばらな読み出しモードでは、VATAGP5 しきい値以上のヒットした全ての ADC 値はそれぞれのトリガー事象、LYSO と WLS 信号との両方のために記録される。この解析はデータ収集の前に取っておいたベダスタル Run が要求される。そして、それはチャンネルでベダスタルの引き算を成す、チャンネルのベース - もし、要求するなら - ADC 値の温度変化による補正による。そして解析は適切な情報を全て抜粋するためにデータを加工する。例えば陽電子と毎相互作用したエネルギー。この情報で、異なる選択カットが適用され、そしていくつかのヒストグラムが充填される。さらに、LYSO エネルギーキャリブレーションの補正、光学的減衰長 (LYSO と WLS の両方) もまた追加項目として解析に含まれる、特にコンプトン事象の再構成のために。

**4. 単一モジュールの特徴:** 光電吸収イベント(例えば、モジュールあたりの LYSO 結晶単体にヒットして、全エネルギーを落とす)は検出効率や一様性、軸の分解能という項で AX-PET モジュールの基本的な性能を特徴付けられていなければいけない。エネルギー分解能を決定するために、LYSO 結晶内の光電吸収と弾性散乱の放射能の両方を使ってエネルギー・キャリブレーションを行う。加えて、光吸収と温度変化による補正はこのセクションの最後に示す。それらはモジュール性能と検出器のより詳しい理解を与えてくれる。またコンプトン散乱事象を考慮することもできる。結晶内のコンプトン相互作用を分けるためのアプローチと決定されたモンテカルロモデルでのデータ比較は今回の論文のテーマである<sup>[14]</sup>。

**4.1. 結晶と WLS の応答:** 一つのモジュール内の LYSO 結晶のすべての多重層は演繹的に以下を許可する: 全モジュール以上のエネルギー和の提供は外部トリガーのディスクリ要求を果たす(?)。巨大な記録データの一部(60%より多く)はモジュール内で LYSO だけにヒットしたイベントに一致する。エネルギーのトリガー要件を与えたとき、これらイベントは結晶内で最初に光子と純粋に相互作用した長さの広がりを示す。多重 LYSO の単純なカットはソフトなコンプトン散乱からの小さな汚染は防止しない。加えて、同じ結晶内で散乱して光電吸収によって従うコンプトン相互作用は最初の光電相互作用から区別しないだろう。

図9は LYSO 板の一つの信号における典型的なエネルギー分布であり、全イベント(光電効果とコンプトン散乱)と LYSO に多重ヒットしたイベント(光電吸収)の両方は1である。コンプトン散乱からの寄与をほぼすっきりと追い払う、多重のカットを適用した時に、光電ピークの低いエネルギーのテイルを除いて。全エネルギー分布における最も低いエネルギーピークは Lu の K 殻からの特性 X 線放射で、約 55 keV に相当する<sup>[15]</sup>。このピークは考えられる板の周りの LYSO 結晶の光電吸収過程と同時に起こる光子に一致する; こいつらが結晶から逃げて、放射する、そして結局はひとつに選択されて検出される。その分布は図9に示し、モジュール内でランダムに LYSO 結晶を選んだ一つを言及しておく、このときモジュールは  $^{22}\text{Na}$  線源からの 511 keV を一様に被曝させている(たとえば、big tagger のセットアップ)。モンテカルロデータによってこのデータスペクトラムは実際に再構成された<sup>[13]</sup>。精密なモンテカル

口分布は参考文献<sup>[14]</sup>で更なる証明をするだろう。

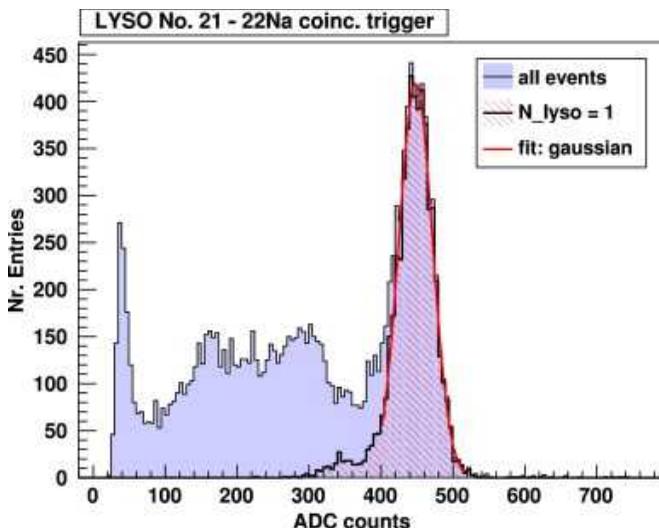


図9. LYSO 板一つの 511 keV 光子検出の電荷スペクトラムで、全イベント (no cut, 実線のヒストグラム) と光電吸収のイベントの両方。ガウス FIT はほぼ光電ピークに適用している。

小さい標的でのセットアップからコリメートされたビームの場所は WLS ストリップの応答特性に使用される。図 10 は WLS ストリップのいくつかを代表した生 ADC スペクトラムを示す。このストリップは単一 LYSO 板の同じ層に対応し、ビームの場所はモジュールの中心にコリメートされ、そして WLS ストリップの中心にフォーカスされる。相対的に比較するために、WLS ストリップの3つを代表を示す: 中心のひとつ (これはビームにあたっており、最大の信号が検出される); 2側面のひとつで近隣のストリップ (これは信号の重要な部分で検出される); 周囲のストリップ (これはノイズのみが記録される)。一貫した振る舞いはその層の WLS ストリップの全 26 ポジションすべてが記録される。z座標の再構成のため、ノイズからの寄与を樹居しなければいけない。これをするため、集団のアルゴリズムは LYSO 結晶の同じ層ですべての WLS 検出に適応させる。集団は周囲のしきい値を超えた WLS ストリップのグループとして定義される。集団の WLS ストリップのみはz座標の再構成の計算に使用され、重み平均として得られ (イベント毎に)、ストリップの軸座標の、個々のストリップ応答を超える重み。(?)この集団の合算した分布 (図 11) は光電イベントの全集光量の情報を成している。集団アルゴリズムはノイズを除去でき、主に低い ADC 値の WLS ストリップを等方的に構成する。

WLS ストリップのキャリブレーションは ( ) 例えば ADC カウントから高電子数の変換)、2種類の方法で行った: 既知の電荷を直接入力した読出しの連鎖とダークノイズの積分したスペクトラムからの単一光子の応答の絶対的なキャリブレーションである。両方の方法では比較して 3 – 4 ADC/p.e.の結果を読んだ。図 11 の分布に合算された集団の平均値から、イベントに伴ったすべての WLS で全体的に約 100 p.e.の光量が達成された。これは 511 keV の光電吸収イベントと結晶で落としたエネルギーに比例したスケールに対して妥当であり、約 100 keV の最小光子エネルギーへと下がった。最低エネルギーの光子のために、軸座標は

もはや信頼して再構成されない。集団内の光量は平均して3つのストリップ間で共有される。期待とは反対に、クラスター内の多重ストリップの全光量の線形依存性が観測された。この効果（調査の下で確かに<sup>[16]</sup>）はしかし、z座標の再構成をととも強く制限される。

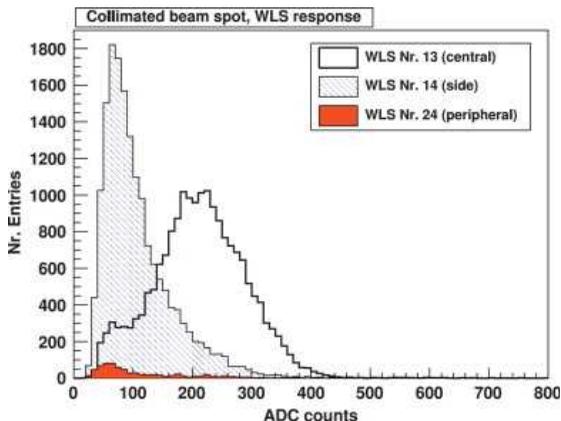


図 10. WLS ストリップで検出された 511 keV 光子。そのヒストグラムはモジュール内の3つ代表する WLS ストリップの電荷スペクトラムを示し、コリメートされたビームでの光電吸収イベントのため、モジュールの中心は No. 13。考えられる WLS ストリップは同様の層で単一結晶で検出されている。3つの代表は (No. 13, 14, 24) の位置である。

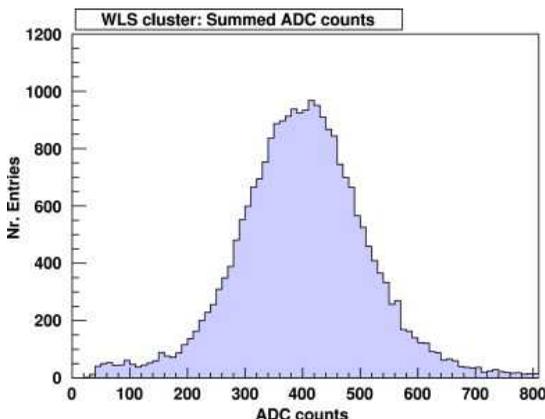


図 11. WLS 群に属している WLS ストリップすべて合算した電荷スペクトラム、これは LYSO 板上で光電吸収したイベントである。この群での平均合計光量は約 100 p.e.である。

**4.2. Detection efficiency and uniformity:** 光電吸収のイベントのため、光子相互作用点の空間情報は明白に得られる、空間分解能内で。長軸断の座標 (x,y) は全エネルギーの落としたものが検出された時、結晶の中心で与えられる。軸z座標は識別された集団の WLS ストリップで重心の適用から得られる。ターゲットにおける良い一様性は (モジュールにビームの位置サイズが巻き込まれて) 成し遂げられ、図 12 に示される。

層当たりの光電イベントの統計から、近似的にLYSO 行列の減衰長( $\lambda_{511}$ )の測定が得ることができる。結果は 図 13 に示す: 測定値は  $\lambda_{511} = (3.973 \pm 0.033)$  で、層は 3 mm、つまり  $(11.9 \pm 0.1)$  mm であり、LYSO のデータシートからの名目上の値にとっても良く一致する。減衰長の得られた値は 511 keV 光子の分岐の寄与も含み、そして物質の厚さを横切った有効な層の Y のふらつきは他へのイベントから変更する。(?)

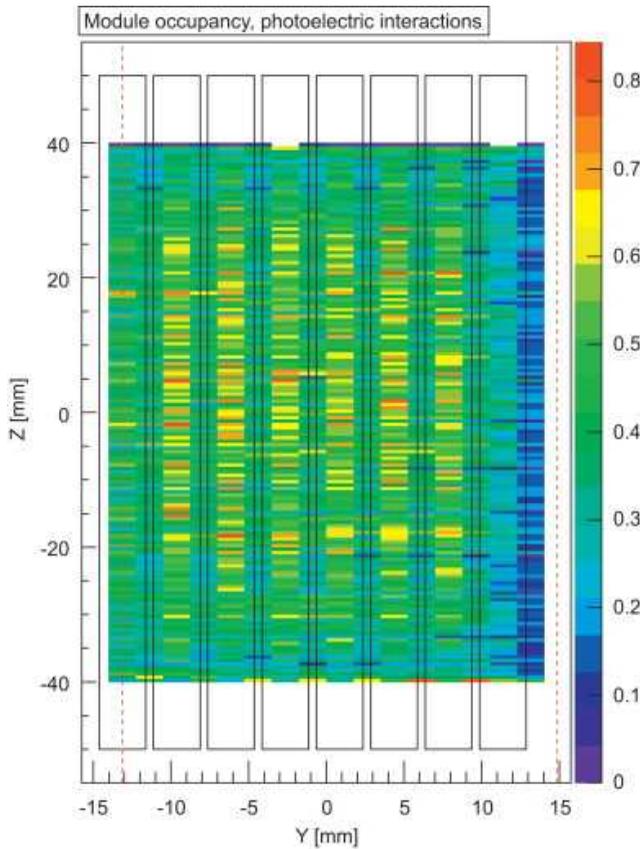


図12.

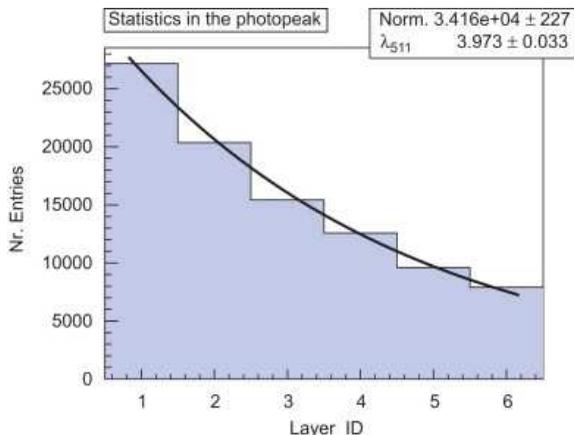


図13.

**4.3. Axial resolution:** 光子相互作用の z 座標再構成はコリメートされたビームのセットアップで測定され(セクション 3.1 で説明された)、軸分解能の推定を得ることができる。図 14 に示した再構成 z 分布のフィットした  $\sigma$  値は、検出器固有の空間分解能  $\sigma_{intr}$  と光子ビームサイズ  $\sigma_{spot}$  のたたみ込みである。あとで純粋な幾何学的な成分  $\sigma_{geo}$  を含み、 $e^+$  対消滅の物理からの寄与と一緒に。例えば、有限の位置幅  $\sigma_\rho$  と共線性のない2つは光子  $\sigma_{NC}$  を放射する:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{intr}^2 + \sigma_{spot}^2} = \sqrt{\sigma_{intr}^2 + \sigma_{geo}^2 + \sigma_\rho^2 + \sigma_{NC}^2} \quad (1)$$

この  $\sigma_\rho$  の値は参考文献 [17] で引用された FWHM 0.54 mm の値から得られている:  $\sigma_\rho = 0.23$  mm. 共線性のない2つの光子は ガウス分布の角の約  $0.5^\circ$  の FWHM の幅 [17] から記述される:これは分解能の項を導き、これは線源と検出器の間の間隔 d で調節する:  $\sigma_{NC} = 0.0037d$ . 有限サイズのタガーのために幾何学的なビーム位置のお香は線源からの距離に比例して調節する。線源の物理サイズ (0.25 mm 直径) は実際には無視できる。以上の考察に従って、固有の空間分解能は 6 層の z 座標の測定のフィットされた  $\sigma$  から得られる。外装された間隔 d は 0 である。図 15 は  $\sigma^2$  と  $d^2$  のデータポイントを示し、2 つのモジュールの 6 層での個々の測定として、線源からの間隔の関数として再構成された z 分布幅の増加はビームの発散と共線性のない寄与によって説明される。式(1)の  $\sigma^2$  vs.  $d^2$  測定線形補間は正当である。このゼロ間隔への補間は幾何学的と非共線性の項両方を除く。まだ横取りしている軸の平方根 (?) は固有の分解能と有限の幅の寄与を含んでいる。直交  $\sigma_\rho$  項で引くと、固有の軸分解能は 1.75 と 1.82 mm (FWHM) が 2 つのモジュールで得られる。

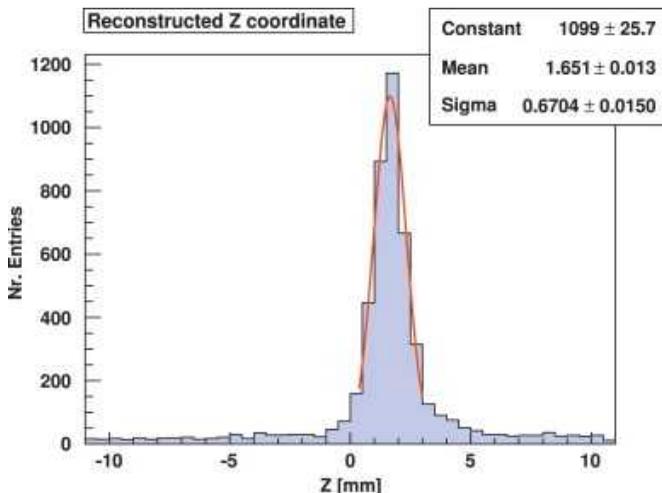


図14.

**4.4. Intrinsic radioactivity in the crystals:** LYSO の固有放射能は単一の  $3 \times 3 \times 100 \text{ mm}^3$  結晶板から出るベータ崩壊の約  $250 \text{ Bq}$  の放射能を占め、モジュールごとに  $12 \text{ kHz}$  の頻度に一致する。ベータ放射は  $\gamma$  光子によって同時に起こる。特にこの結晶の幾何学、体積比を超えて高い表面をもつ、とモジュール配列でこれらぎっしり詰まった組立(アセンブリ)が与えられた時、重要な固有放射能からの光子のゆらぎは結晶へ逃げる事が出来、そして近接したものによって検出される。これはベータ粒子の問題ではない、というのは結晶で生成してそれらすべてエネルギーを落とす。典型的な LYSO 結晶の単一の固有放射能のエネルギースペクトラムを図 16 に示す。これらデータの精密なモンテカルロ記述は文献<sup>[14]</sup>で証明されるだろう。スペクトラムの連続的な記述は結晶自体の固有放射能 ( $\beta$  と  $\gamma$  トラップ) を意味し、このピークは隣の結晶によって生成された  $\gamma$  のため、そこから逃げてきている。そして、ついに考えられる結晶で検出される。2つの高いエネルギーピーク (202 と 307 keV) は固有放射能からの光子の準励起に一致する。3 目目の光子 (88 keV) は検出されない、なぜなら主にこれは内部転換確率が高いからである<sup>[18]</sup>。最も低いエネルギーピークは LuX 線である (55 keV)。

LYSO 結晶の固有放射能は示すとして、これはエネルギー校正の強力なツールになる。ガウスフィットはピークで適用して、そしてこれらの位置を抽出した。 $^{22}\text{Na}$  を使用しない納められたランと使用した読出しは内部トリガーマードで制御され、内部放射能のスペクトラムを得た。

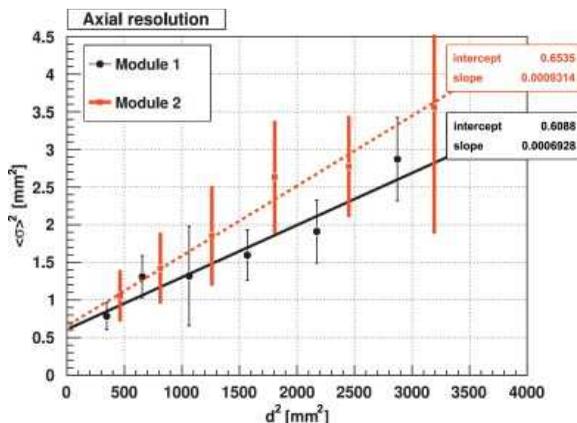


図15.

**4.5 Energy calibration of the crystal:** 結晶内のエネルギー校正のゴール(例えば ADC カウントからエネルギー単位へ変換)は 2 倍ある: 配列でのすべてのチャンネルでの均等化と MPPC の非線形性の補正。エネルギー校正はたしかに必要なコンプトン散乱事象の再構成のためには、エネルギーの一部は知られていることが要求される。しかしエネルギー分解能の正しい決定も必要とされている。

エネルギー校正はチャンネル基準に行われ、固有放射能と外部トリガースペクトラムの両方を使用して、これはそれぞれ 図 16 と 9 に示している。知っているエネルギーピークのガウスフィットは(すなわち LuX 線 11 keV と Lu $\gamma$  崩壊(202 keV と 307 keV)、そして光電ピーク 511 keV)が適用される。図17のような曲線はそれぞれの LYSO 結晶のために得た。低エネルギーでの MPPC の応答は線形だが、光電ピークちかくですでに飽和状態が始まっている。これは結晶からの重要な光量をピクセルの限られた数に結合させるためである。約5%の線形線からの標準偏差は 511 keV で測定された。ADC vs. エネルギースケールはしたがって、3パラメータのフィッティング関数でパラメータ化される:

$$E(\text{ADC}) = p_0 - p_1 \cdot \ln(1 - \text{ADC} / p_2). \quad (2)$$

最適なエネルギー分解能保証のため、校正の手順は 96 個の結晶と MPPC のペアすべてを個々に適用した。

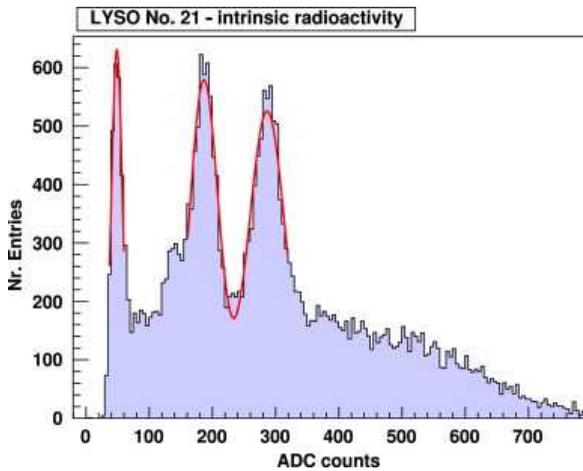


図 16.

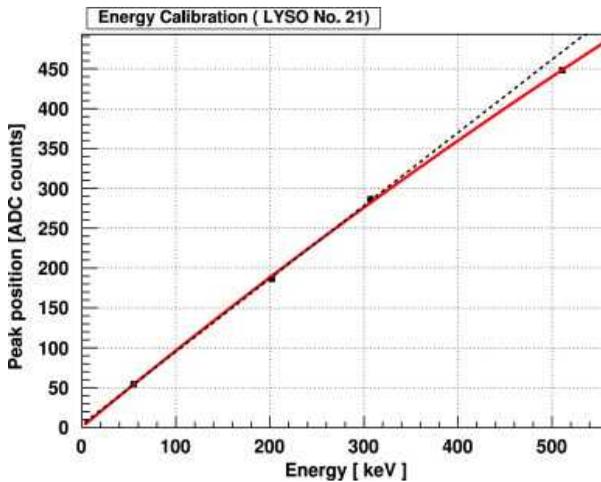


図 17.

**4.6. Energy resolution:** 結晶のエネルギー分解能と一様性の項における良い結果が得られた。図 18 と 19 に示すとして。両方のプロットはエネルギー校正した後の LYSO で測定したエネルギーを言及しておく、たとえば MPPC の非線形性はすでに補正されている。

図 18 で、511 keV で平均エネルギー分解能が 11.8% (2 つのモジュールで 96 個の結晶

で得られた)が証明された;結晶の違いの間の良い一様性も観測された。

図 19 でイベント毎のエネルギー和の分布から矛盾のない互換性のある結果も得られる。ここでエネルギー分解能は 511 keV で FWHM 12.8% が得られた。この和の分布はモジュールのハードウェア・アナログの和のヒストグラムではないことを通知すべきである;そうでなくて、これはそれぞれのイベントで記録されたエネルギーの合計である。校正手順から引き出した小さな不確かさは合計でエネルギー分解能を悪くしうる、単一結晶の平均分解能と比較して。一方、エネルギー和の分布は外部トリガーの補正の役割を証明し、モジュールのエネルギー和での高いエネルギーの区別で。この分布は2つのガウス関数でフィットされ、LuX線エスケープピークと光電ピークを表している。この遅れは(分かれているピークとして解けない)非対称の合計されたエネルギー分布の継承が理由である。同じようなプロットで、異なった多重結晶ヒットの合計の相対的な寄与も示される。

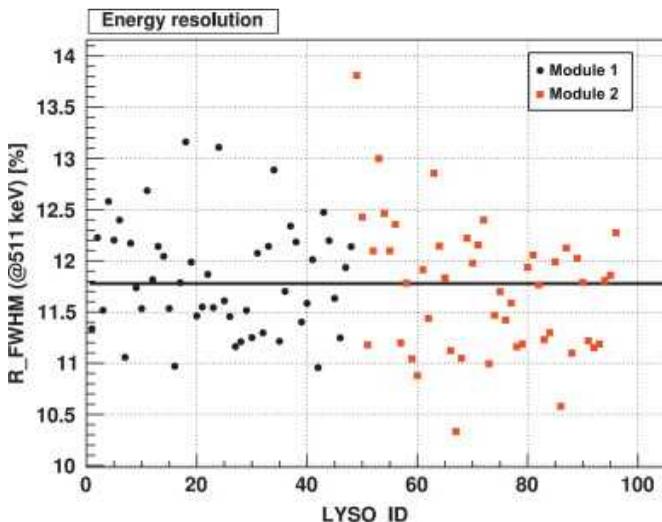


図18

**4.7. Path length dependence of the light yield:** LYSO 結晶の伝搬する間のシンチレーション光の吸収を研究した。解析のオプションとして、この効果によってデータを補正できた。コリメートされたビームがある一つの LYSO 結晶の中心でz方向に沿ったスキャンはさまざまな軸位置におけるエネルギー測定を示す。図 20 を見よ。エネルギー校正と同様に、その手順は各結晶個々に繰り返される。その振る舞いは以下の式で示すフィッティング関数で独立にパラメータ化される。

$$E(z) = N( e^{-z/\lambda} + R e^{-(2L-z)/\lambda} ) \quad (3)$$

ここで、 $\lambda$ ,  $R$ ,  $N$  はそれぞれ、有効な光学的な減衰長、反射コーティングの反射率(反対側の  $P < T$  で)、そして規格化因子を示す。 $L$  は結晶板の長さで、10cm に等しい。図に示すとして、反射率のフィットはデータをよく再構築させないのよりも 90% 小さくさせられる(?)。すべてのフィットパラメータ  $\lambda$ ,  $R$ ,  $N$  が自由の時、非物理的な値  $R > 1$  と減衰長の減った優位性がわかる。これは式(3)で提案された単一の吸収現象でこの吸収のメカニズムを説明できることを指し示すが、これの他の寄与による因子がある、結晶配列で並べて組み立てたものに関係した

効果または蒸着金属面で構成した反射の拡散のような。LYSO データが光学的減衰長にうよって吸収された時、 $E=0$  ( $z=0$ ) を外挿することによって、LYSO のエネルギー和のエネルギー分解能の 0.15% の向上がえられる (12.77% から 12.62% へ)。同様に WLS ストリップの内部の伝播による光学的な減衰長の研究がを行った (図 21)。ここで、単純な指数関数フィットを使用して光量に依存した透過距離を説明する。

$$E(z) = N e^{-z/\lambda} \tag{4}$$

WLS ストリップの生データは減衰長と一様これらの応答のために補正され、良い一様性を獲得した。達成した空間分解能の向上はしかしただ極小である。

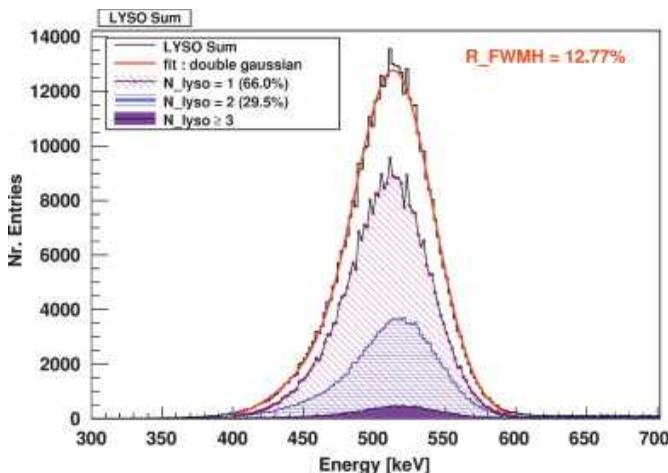
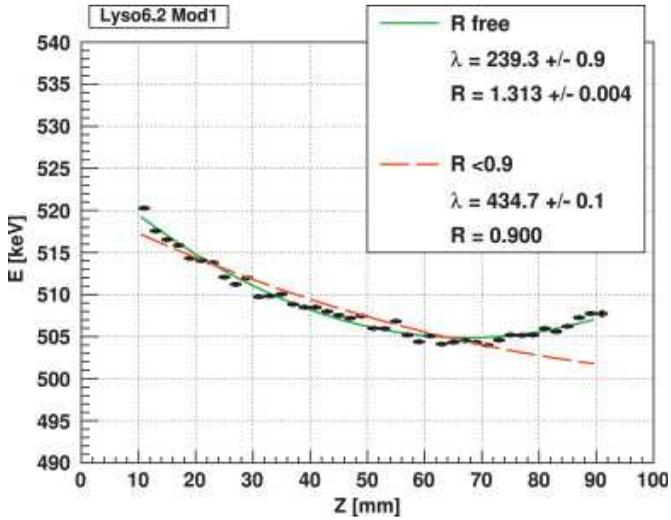


図 19.

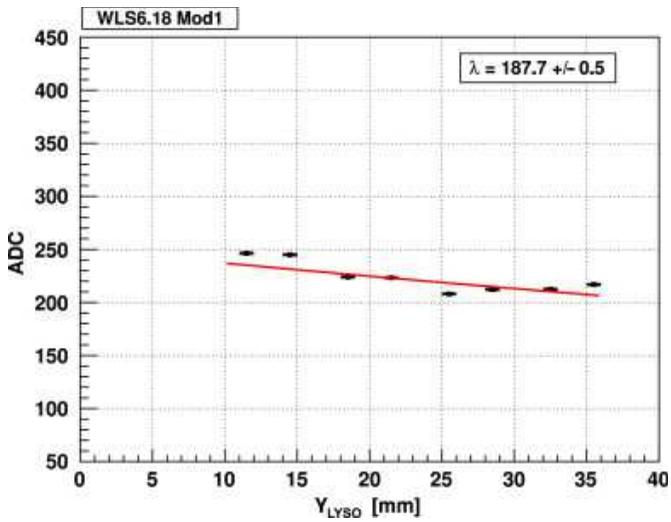
**4.8. Temperature correction coefficient:** 説明として、MPPC のためのバイアスはそれぞれのランの最初で記録された温度に従って設定される。長いデータ収集の期間のために (つまり継続していくつか走らせてスキャンした)、これはしかし非実用で時間を消費するだろう。このバイアスはそしてデータ収集の開示でのみ設定し (温度  $T_0$ ) で、そして記録された ADC 値はオフラインで補正される。測定された温度変化  $\Delta T = T - T_0$  を使用して。温度計数  $\alpha = dG/dT$  はデータ (図 22) から直接得られ、同一の実験的狀況で繰り返し測定したことによって、温度を変えている間。これらのランのために、このバイアスは初めの ( $T=T_0$ ) に設定され、光電ピークの位置は参考として取られた。広い温度領域を超えた温度で与えられる線形変化を測定で確認した。温度補正計数は  $\alpha = dG/dT = -4.8\%/K$  (補正前のデータポイント) である。データでのオフライン補正は以下で実行される。

$$ADC^{OUT}(T) = ADC^{means}(T) (1 + \alpha \Delta T)^{-1} \tag{5}$$

全温度領域を超える補正手順の適切な関数は補正後のデータポイントから見られる。



20.



21.

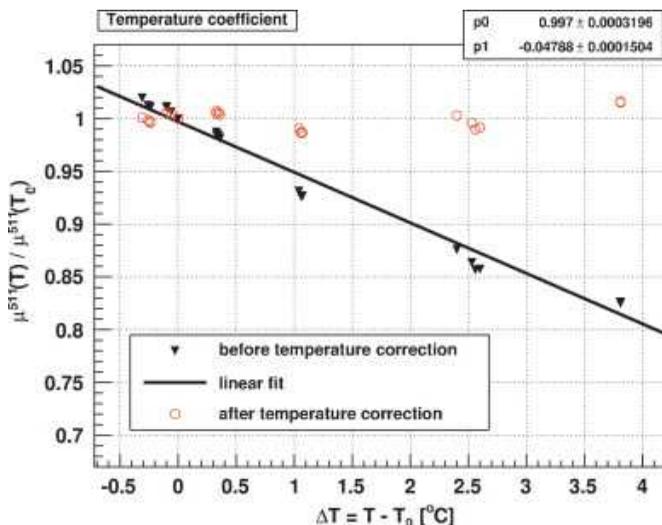


図22.

**5. Coincidence measurements:** 同時計測で2つのモジュールを使用した時、モジュールの時間と空間分解能に関係した性能の補足情報が得られる。

**5.1. Time resolution:** AX-PETの読み出しは個々のチャンネルから任意の時間情報が与えられる。与えられた測定時刻は Lecroy Waverunner LT584 を使用して行われた、これは 1 GHz のオシロスコープで、合算された信号 (LL x HL x FHL) のモジュールの Disc された出力の間の相対的な遅延を得た。2つのモジュール間の測定時刻の変動は 図 23 で示される。時間分解能約 800ps が達成された。ただし、これは時間差曲線の標準偏差として測定している。これは LYSO シンチ結晶の減衰時間からと、光子の結晶を通して伝搬する時間そしてフロントエンドとトリガー電子回路からの寄与を含んでいる。達成された時間分解能は2つのモジュール間の数 ns の小さい同時計測窓を可能にするだろう。アクシデンタルなトリガーを最小限にするだろう。しかし、現在の AX-PET の回路はトリガーのための最小のパルスが要求され、そのデータルックは約 60ns である。これは時間性能の全利益へシステムを防止し、特にアクシデンタルを除去するためである。

**5.2. Focal plane reconstruction:** 同時計測で2つのモジュールを使用して、線源の位置の単純な2つの次元の幾何学的な最高精が達成される、検出された応答線 (LOR) のすべての相互作用で。この目的のために2つのモジュール両方で光電効果事象のみが選択され (全体の ~44% の統計)、そして相互作用した座標点が2つのモジュールのそれぞれで決定される、普通の方法で。横軸座標 (X,Y) は LYSO 結晶の中心で与えられ (離散的な変数)、軸座標 Z は WLS 集団の重心から計算される (連続的な変数)。それぞれの事象で、2つの相互作用した点を結んで線が描かれる、その XY 射影と XZ 射影の両方を 図 24 に示す。中心の平面 (X=0) でこれら LOR の交点は線源の2つの次元の幾何学的な再構成で決定する、軸そして横軸方向で (図 25 と 26)。

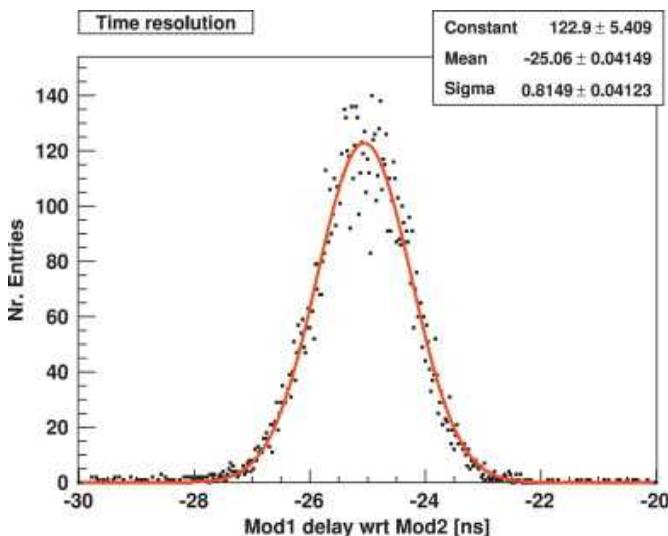


図23.

**5.3. Axial resolution:** LORの焦点平面のz座標に適用したガウスフィット(図25)はシステムの軸分解能が得られる兆候を与える。フィットされた  $\sigma$  は2つのモジュール固有の分解能、有限の位置幅、そして光子が放出された非線形(モジュールとの間隔は 150 mm)からの寄与を含んでいる。 $e^+$  消滅物理からの寄与が減ったとき、固有の軸分解能 1.34 mm (FWHM) が得られた。単一モジュールの分解能と比較すると( $\sim 1.8$  mm、セクション 4.3 を見よ)、因子として平方根 2 分の 1 の向上期待が得られる。

**6. Conclusion and outlook:** 提供した記事は AX-PET の実証を記述し、同時計測で全く同一の2つのカメラモジュールを使用してなした。この実証は AX-PET のコンセプトの操作上の実証を完全に示している。このコンセプトは長い軸方向の結晶板と直交するWLSストリップの配列がベースとなっている。実証器の2つのモジュールは  $^{22}\text{Na}$  点線源を使用して感度、一様性、空間分解能、エネルギー分解能のすべての項を特徴付けられた。測定の記述では解析は光電吸収事象に制限した。加えた補正(エネルギー校正と光量の伝播依存)は検出器の良い理解が含まれている。これらの補正は非常に重要で、結晶マトリックスでコンプトン相互作用の事象を含めるだろう。特徴の測定の方法と結果はこの論文に詳しく述べている。この性能は AX-PET 実証器が得た標準の幾何学に代わりとなる高い競争馬(コンペティティブ)としての AX コンセプトの確認を示す。

一方、実証器のセットアップはさらに実際の PET の同時計測の設定で特徴付けられる、点線源と複雑なものを含んでいるファントム(?) (毛細血管、シリンダー、マイクロ Derenzo, NEMA) が  $^{18}\text{F}$  ベースの FDG 放射性トレーサで満たされている。2つのモジュールから得られたものはリング有効の不完全を許容する。これは線源とファントムの位置を回転することで補

われる。再構成コードとファントムの断層画像を与えられた詳細は現在再構成して、今度記事で公開されるだろう。

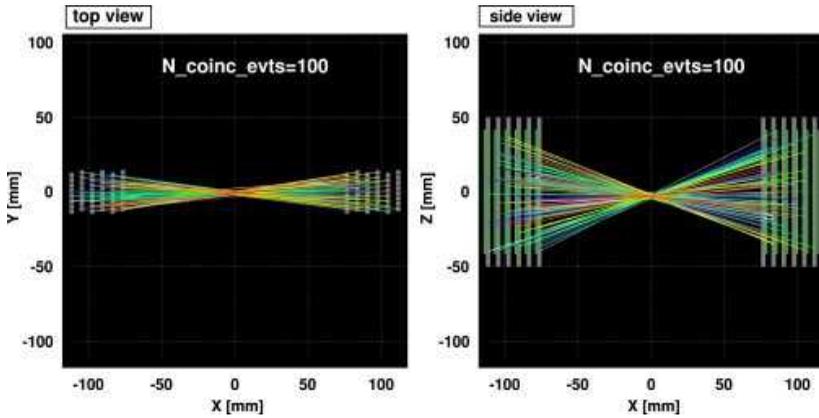


図 24.

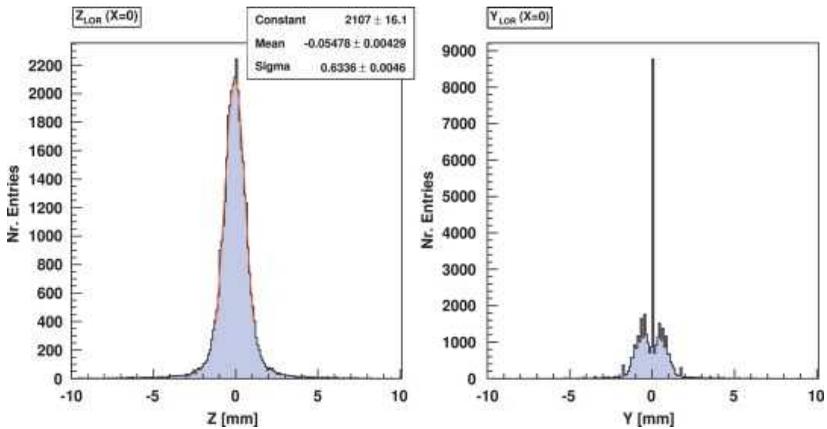


図 25.

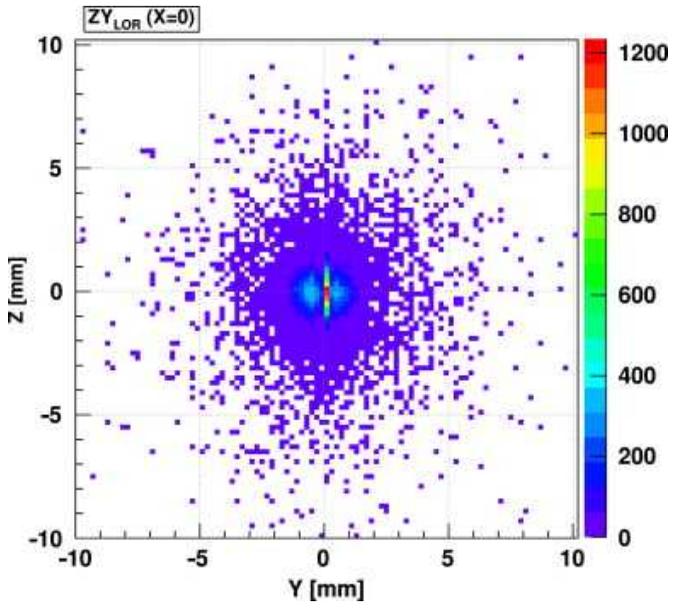


图 26.